



Désagrégation numérique de précipitations en Afrique australe et dynamique atmosphérique associée

Julien Crétat, Benjamin Pohl, Philippe Drobinski, Yves Richard

► To cite this version:

Julien Crétat, Benjamin Pohl, Philippe Drobinski, Yves Richard. Désagrégation numérique de précipitations en Afrique australe et dynamique atmosphérique associée. Bulletin de l'Association de géographes français, 2010, 2, pp.194-206. hal-00447077

HAL Id: hal-00447077

<https://hal.science/hal-00447077>

Submitted on 15 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Désagrégation numérique de précipitations en Afrique australe et dynamique atmosphérique associée

(NUMERICAL DISAGGREGATION OF RAINFALL
IN SOUTHERN AFRICA
AND ASSOCIATED ATMOSPHERIC DYNAMICS)

**Julien CRÉTAT^{*}, Benjamin POHL^{*},
Philippe DROBINSKI^{**} & Yves RICHARD^{*}**

RÉSUMÉ – Cette étude examine les capacités du modèle *Advanced Weather Research Forecast (WRF)* à simuler les champs saisonniers de précipitations et la dynamique atmosphérique associée en Afrique australe pendant le cœur de la saison des pluies d'été sud-africaines, de décembre 1993 à février 1994. Sa sensibilité à la paramétrisation physique est aussi analysée en termes de quantités précipitées et de types de pluie. WRF simule convenablement les principales structures pluviométriques saisonnières, notamment les Zones de Convergence Inter-Tropicale et Sud Indienne, bien que les pluies y soient surestimées, et le gradient ouest-est observé de la région tropicale en Afrique du Sud. Les régions où le modèle simule le plus de pluies, en particulier sur les reliefs, sont celles où la convergence d'humidité et la vitesse verticale moyenne couche tendent à être les plus fortes. Les quantités précipitées et le type de convection sont davantage dépendants de la paramétrisation de la convection que de celles de la couche limite et de la microphysique. Parmi les tests effectués, le schéma de convection Grell s'avère être le plus performant, simulant à la fois des quantités précipitées relativement comparables aux observations en Afrique du Sud et des systèmes pluviogènes convectifs cohérents avec la saison simulée.

Mots-clés : Afrique australe, désagrégation dynamique, dynamique atmosphérique, Modèle de Circulation Régionale WRF, précipitations.

ABSTRACT – This paper evaluates the ability of the *Advanced Weather Research Forecast (WRF)* model to simulate rainfall and associated dynamical fields over Southern Africa during the core of the austral summer rainy season, from December 1993 to February 1994. The sensitivity to physical parameterizations is also described in terms of rainfall amounts

^{*} CRC - Centre de Recherches en Climatologie, CNRS UMR 5210, Université de Bourgogne, Bâtiment Sciences-Gabriel, 6 boulevard Gabriel, BP 27877, 21078 Dijon Cedex - julien.cretat@u-bourgogne.fr (doctorant), benjamin.pohl@u-bourgogne.fr (chargé de recherches CNRS), yves.richard@u-bourgogne.fr (professeur)

^{**} Institut Pierre-Simon Laplace, Laboratoire de Météorologie Dynamique / Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, courriel : philippe.drobinski@lmd.polytechnique.fr (chargé de recherches CNRS, HDR)

and processes. WRF accurately simulates the main rainfall patterns, particularly the Inter-Tropical and South Indian Convergence Zones (though rainfall amounts are overestimated), and the west-to-east rainfall gradient observed over tropical South Africa. The wettest regions, especially mountainous areas, are those tending to display the strongest moisture convergence and vertical motion in the mid-troposphere. Rainfall amounts and processes are more dependent of convective schemes than planetary boundary layer and micro-physics. The Grell convective scheme appears to be the most efficient, simulating rainfall amounts relatively close to rain-gauge records, and convective processes in agreement with the simulated season.

Key-words: atmospheric dynamics, southern Africa, dynamical disaggregation, rainfall, Regional Climate Model WRF.

Introduction

La désagrégation de données issues de modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) a pris une importance considérable ces dernières années. Elle a pour but de combler le fossé entre les relativement basses résolutions des MCGA et l'échelle régionale, correspondant davantage au vécu des populations, qu'il est nécessaire d'aborder pour étudier les impacts (agronomiques, hydrologiques, sanitaires, ...) de la variabilité climatique. Deux grandes familles d'outils répondent à ce besoin. La première consiste à utiliser des modèles statistiques ou des fonctions ajustées sur les observations [Wilks, 1995 ; Wilby & Wigley, 2000] pour relier les variables de grande échelle aux variables d'échelles régionale à locale. Cette approche a le mérite de tirer parti des observations existantes et d'être peu coûteuse en ressources de calcul. La seconde famille d'outils consiste à désagréger dynamiquement les données climatiques [Giorgi, 1990; McGregor & *al.*, 1993], via l'utilisation de modèles climatiques régionaux (MCR), ou modèles à aire limitée. Bien que considérablement plus gourmands en temps de calcul et en espace de stockage, les MCR ont l'avantage de résoudre les processus d'échelles fines [Leung & *al.*, 2003] en basant leurs calculs sur les lois de thermodynamique de l'atmosphère.

Nous proposons ici d'utiliser le modèle Advanced Weather Research Forecast (WRF-ARW, WRF par la suite) en Afrique australe (sud de 5°S) pendant le cœur de la saison des pluies sud-africaines (de décembre à février, DJF). L'analyse portera essentiellement sur les précipitations et la dynamique atmosphérique associée. Les précipitations sont l'un des champs les plus difficiles à simuler par un modèle d'atmosphère, en raison de la complexité des paramétrisations physiques sous-jacentes et de leur caractère discontinu dans le temps et dans l'espace. Pour cette raison, une attention particulière sera portée sur la sensibilité des pluies simulées aux paramétrisations physiques du MCR.

Les objectifs sont donc ici (1) de déterminer les capacités de WRF à simuler les structures spatiales de la pluviométrie saisonnière en Afrique australe ; (2) d'établir les causes des biais de WRF sur la région *via* une étude des relations entre précipitations et dynamique atmosphérique régionale ; (3) de déterminer la

sensibilité de WRF à la paramétrisation physique en termes de cumuls précipités, et de types de pluies (convectives, non convectives).

Cette étude est structurée comme suit : la section 1 présente le protocole expérimental (saison simulée, données de calibration et méthodologie pour réaliser les expériences numériques). La section 2 présente les structures pluviométriques saisonnières moyennes sur l'Afrique australe, la dynamique atmosphérique associée, et la sensibilité des précipitations à la paramétrisation physique. Nous tirons enfin les principales conclusions et perspectives.

1. Protocole expérimental

1.1. Période analysée

La période d'étude, de décembre 1993 à février 1994 (DJF94), est volontairement courte dans le but de pouvoir multiplier les expériences numériques sans mobiliser trop de temps de calcul et d'espace de stockage. Correspondant au cœur de la saison des pluies sud-africaines, ce trimestre est choisi en raison de sa neutralité en termes de quantités précipitées en Afrique australe, ce sur le plateau sud-africain pour lequel nous disposons de données issues d'un grand nombre de stations pluviométriques, et en termes de forçages large échelle. En particulier, il n'est pas soumis à El Niño Southern Oscillation (ENSO), mode de variabilité dominant dans les tropiques et bien connu pour affecter très fortement les volumes précipités en Afrique du Sud [Lindesay, 1988 ; Rouault & Richard, 2005].

1.2. Données de calibration de WRF

Les forçages latéraux et les champs atmosphériques de référence sont fournis par les réanalyses ERA40 [Uppala & *al.*, 2005]. Ces données, mises à disposition par le European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) de septembre 1957 à août 2002 sur une grille régulière de $1^{\circ}125 \times 1^{\circ}125$. La fiabilité de chaque variable dépend du poids relatif de l'assimilation d'observations et de la physique du modèle dans la détermination du champ géophysique. Sur l'Afrique en particulier, la quantité de données assimilées est faible et inconstante dans le temps [Poccard, 2000]. Les nombreuses incertitudes liées à la qualité des réanalyses [Trenberth, 1991 ; Poccard & *al.*, 2000 ; Trenberth & *al.*, 2001] impliquent que les écarts de WRF par rapport à ERA40 pourront dans certains cas être analysés comme une amélioration du climat régional simulé, grâce à une meilleure physique et une résolution plus fine. Cette hypothèse concerne en particulier les précipitations, variable dépendant fortement des paramétrisations physiques du modèle [Dai, 2006]. Cette hypothèse sera vérifiée grâce à deux jeux de données additionnels.

Les estimations du Global Precipitation Climatology Project (GPCP, [Xie & *al.*, 2003]) sont disponibles au pas de temps pentadaire sur une grille régulière de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ depuis 1979. Elles sont construites à partir d'observations in-situ, de données satellitales et des réanalyses du modèle NCEP/NCAR. Sur l'Afrique du Sud et les pays voisins (Lesotho, Swaziland, et sud de la Namibie, du Botswana, du Zimbabwe et du Mozambique) la base de données compilée par Lynch [2003]

fournit un ensemble de 7665 pluviomètres disponibles au pas de temps quotidien sans valeur manquante sur la période 1971-1999. Une extraction de 5352 stations pluviométriques à régime tropical, recevant au moins 40% du cumul annuel en DJF, est ici réalisée. C'est sur cet espace que la sélection du trimestre DJF94 a été effectuée [Crétat & *al.*, 2009].

1.3. Expériences numériques

Le MCR utilisé est la version 3.0.1.1 de WRF [Skamarock & *al.*, 2008] développé au National Center for Atmospheric Research (NCAR). Nous utilisons ici le noyau ARW (Advanced Research WRF) adapté pour la simulation climatique. Les principaux atouts de ce modèle sont de s'appuyer sur un système de projection verticale en niveau sigma lui permettant de prendre en compte plus finement la circulation atmosphérique des basses couches atmosphériques. Le modèle propose également une liste importante des schémas récents de radiation, couche limite, convection et microphysique, et peut être couplé à un modèle de surface continentale.

Les expériences sont réalisées sur le domaine 46°S-5°S, 3°E-56°E, à une résolution horizontale d'environ 35 km, et avec une résolution verticale de 23 niveaux sigma. Toutes les intégrations sont initialisées au 17 novembre. Les données sont analysées entre le 1er décembre 1993 et le 28 février 1994, laissant au modèle une mise à l'équilibre de 15 jours. Les expériences sont forcées latéralement toutes les 6 heures par les réanalyses ERA40. Le couplage continent-atmosphère se fait via le modèle de surface continentale NOAH [Chen & *al.*, 1996 ; Koren & *al.*, 1999]. Les données de surface utilisées pour l'initialisation proviennent du United States Geological Survey (USGS) à une résolution de 10 minutes d'arc. Les transferts radiatifs sont gérés par le schéma RRTM [Mlawer & *al.*, 1997] pour les ondes longues et le schéma Dudhia [Dudhia, 1989] pour les ondes courtes. Le pas de temps du modèle est fixé à 150 secondes, les champs étant archivés toutes les 6 heures.

Couche limite	Convection	Microphysique
Mellor-Yamada-Janjic (CL1)	Kain-Fritsch (CO1)	WSM6 (MI1)
Yonsei (CL2)	Betts-Miller-Janjic (CO2)	Eta (MI2)
ACM2 (CL3)	Grell (CO3)	Morrison (MI3)

Table 1 – Schémas physiques utilisés pour les 27 expériences numériques.

Sur le trimestre retenu, une série de 27 intégrations est produite, correspondant à toutes les combinaisons possibles entre 3 schémas de couche limite, 3 schémas de convection et 3 schémas de microphysique (Tab. 1). Les schémas de couche limite contrôlent la turbulence, la convection profonde, les échanges de chaleur entre surface et basses couches, et l'humidité. Les schémas de convection contrôlent la convection, profonde ou non, ainsi que la formation des nuages et des précipitations. Les schémas de microphysique concernent les échanges d'énergie à l'intérieur des nuages.

Nous considérons ici principalement la moyenne d'ensemble des 27 expériences (ENS27), qui documente de manière synthétique les performances de WRF sur l'Afrique australe. Deux échelles spatiales sont retenues pour l'analyse des précipitations : l'Afrique du Sud à régime pluvial tropical (encadré Fig. 1a), et l'ensemble du domaine simulé (Fig. 1). Quelle que soit l'échelle spatiale considérée, les données utilisées pour calibrer WRF sont projetées sur la maille du domaine simulé. L'absence d'approche ensembliste interdit de distinguer la variabilité interne du modèle et la variabilité externe imposée par les forçages latéraux [Alexandru & *al.*, 2007]. Seuls les aspects moyens peuvent donc être appréhendés dans cette étude, *i.e.* les moyennes saisonnières et les biais moyens. Les biais sont ici définis comme les écarts des champs simulés aux données observées de référence.

2. Résultats

2.1. Structures pluviométriques moyennes et biais saisonniers

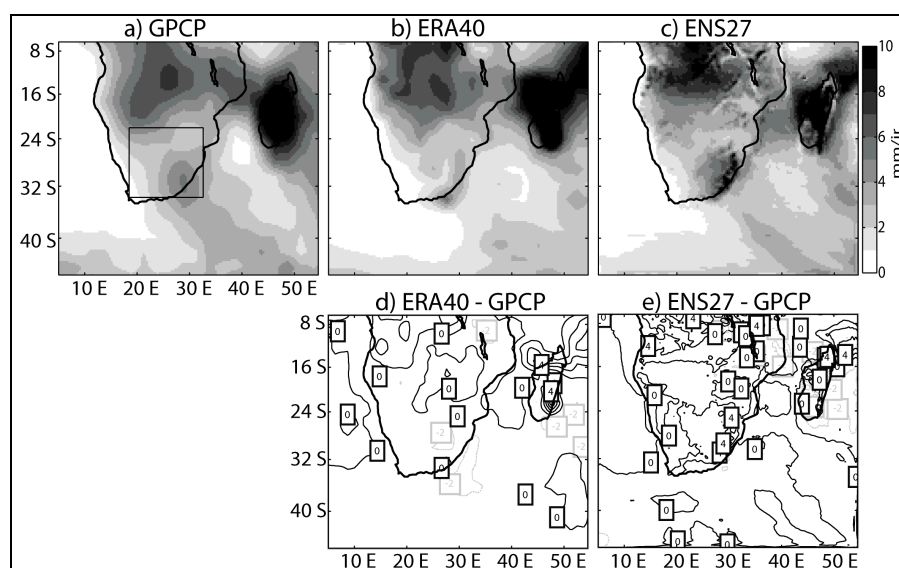


Figure 1 – Moyenne saisonnière (DJF94) des précipitations (a) estimées par GPCP, simulées (b) par ERA40 et (c) selon la moyenne d'ensemble WRF (ENS27), et biais saisonniers (d) ERA40 et (e) ENS27 par rapport à GPCP. L'encadré en (a) localise les stations pluviométriques à régime tropical extraites du fichier Lynch (2003). Les traits continus (pointillés) montrent les biais humides (secs). Seuls les biais compris entre -5 et +5 mm/jr sont montrés. L'intervalle entre chaque isohyète (étiquette) est de 1 mm/jr (3 mm/jr).

A l'échelle de l'Afrique australe, le champ pluviométrique présente un gradient sud-nord assez prononcé, les cumuls saisonniers étant maximaux aux latitudes tropicales en lien avec la position australe de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) durant cette saison. Le pourtour sud de la cuvette congolaise et surtout Madagascar apparaissent comme les deux régions les plus arrosées (Fig. 1a). Plus au sud, une bande orientée sud-est nord-ouest relie le sud-ouest de l'océan Indien au centre de l'Afrique Australe. Elle correspond à la Zone de Convergence Sud Indienne (SICZ, [Cook, 2000]) où prennent place de manière préférentielle les interactions entre dépressions des moyennes latitudes et systèmes pluvieux tropicaux [Todd & Washington, 1999 ; Washington & Todd, 1999]. Au sein de la SICZ, les cumuls journaliers maximums (supérieurs à 4 mm/jour) sont atteints sur le massif du Drakensberg.

Les Figures 1 b-c et 1 d-e illustrent respectivement la pluviométrie saisonnière simulée par ERA40 et ENS27, et leurs biais saisonniers par rapport à GPCP. ERA40 sous-estime les quantités précipitées de la SICZ et surestime celles de la branche indienne de la ZCIT, à proximité de Madagascar. Les résultats sont plus nuancés pour ENS27 : les pluies au niveau des ZCIT et SICZ tendent à être surestimées, excepté le sud de Madagascar. Le MCR tend donc à corriger les biais secs de ERA40 au sud-ouest de l'Afrique australe et une partie des biais humides de Madagascar. Les biais saisonniers ERA40 et ENS27 (Fig. 1 d-e) sont quasiment identiques sur les océans alors qu'ils diffèrent fortement sur le continent. Ce constat suggère une valeur ajoutée plus faible du MCR sur les océans, en lien possible avec l'absence de couplage entre océan et atmosphère.

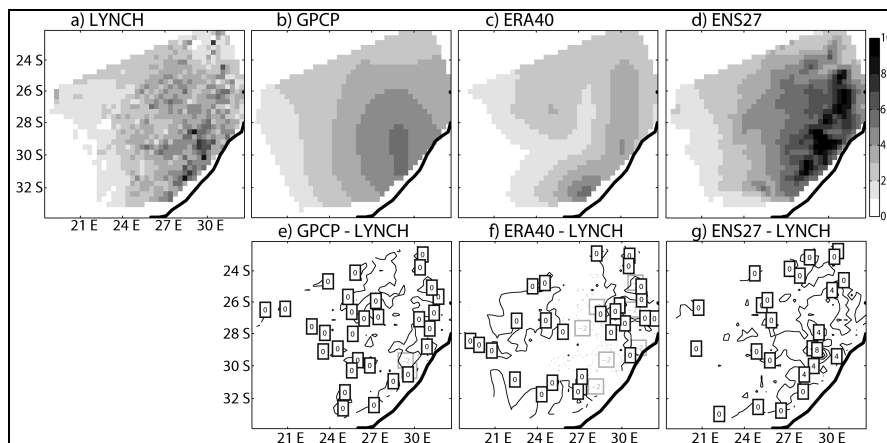


Figure 2 – Moyenne saisonnière (DJF94) des précipitations (a) observées par LYNCH, (b) estimées par GPCP, simulées par (c) ERA40 et (d) ENS27, et biais saisonniers (e) GPCP, (f) ERA40 et (g) ENS27 par rapport à LYNCH. Les traits continus (pointillés) montrent les biais humides (secs). Seuls les biais compris entre -5 et +5 mm/jr sont montrés. L'intervalle entre chaque isohyète (étiquette) est de 1 mm/jr (3 mm/jr).

A l'échelle des stations de l'Afrique du Sud à régime pluvial tropical, le gradient ouest-est observé (Fig. 2a) est représentatif de la climatologie DJF de la région [Crétat & *al.*, 2009]. Ce gradient est bien reproduit dans GPCP et ERA40, mais la résolution spatiale est trop lâche pour documenter précisément les variations spatiales générées par le relief. Malgré les forts biais humides (Fig. 2g) sur les reliefs, la structure spatiale obtenue par désagrégation dynamique est plus convaincante, car plus fine spatialement que les estimations GPCP et les réanalyses ERA40. Mis à part sur le Drakensberg, les pluviométries GPCP, ERA40 et ENS27 sont souvent proches de celle observée (Fig. 2e et g), avec une tendance commune à surestimer les quantités moyennes. Le gradient fourni par ERA40 est tout de même moins franc (Fig. 2c) et des biais secs sont observés (Fig. 2f) au centre de la région et surtout sur le Drakensberg.

2.2. Dynamique atmosphérique associée

Les Figures 3 et 4 présentent respectivement les moyennes et biais saisonniers des flux d'humidité intégrés entre 1000 et 200 hPa, de leur convergence, et de la vitesse verticale du vent en moyenne troposphère. Ces trois variables synthétisent le transport d'humidité et la convection atmosphérique.

Les structures spatiales de la thermo-dynamique atmosphérique sont cohérentes avec les structures pluviométriques décrites plus haut. Les régions les plus arrosées sont celles pour lesquelles la convergence d'humidité et la vitesse verticale de l'air à 500 hPa sont maximales. Les structures spatiales simulées par ENS27 semblent à nouveau plus réalistes que celles de ERA40 dans la mesure où elles semblent forcées par la topographie.

Comme pour les précipitations, les différences majeures entre ERA40 et ENS27 se localisent sur le subcontinent et à proximité de Madagascar. Pour Madagascar et ses pourtours, la convergence d'humidité (Fig. 3f) et la vitesse verticale du vent à 500 hPa (Fig. 4c) sont plus fortes dans ERA40 que dans ENS27, excepté sur les reliefs, ce qui explique que les réanalyses y simulent davantage de pluies. Au niveau de la cuvette congolaise, les quantités précipitées sont plus importantes dans ENS27 que dans ERA40, ce qui résulte d'une convergence d'humidité accrue dans ENS27 (Fig. 3f). L'ascendance de l'air y est cependant plus forte dans ERA40 (Fig. 4c), ce qui suggère que les précipitations de cette région sont davantage connectées à la convergence d'humidité qu'à l'ascendance de l'air en moyenne troposphère.

Dans ERA40 comme dans ENS27, la majorité de l'humidité disponible au-dessus de l'Afrique australe provient de l'océan Indien, surtout du sud ouest. La Figure 3c montre tout de même une plus forte pénétration de ces flux, tant au nord de Madagascar qu'au sud dans ENS27. De plus, la plupart des flux d'humidité ERA40 originaires du bassin Indien transitent zonalement et rejoignent l'Atlantique sud à la verticale de l'Angola. Dans ENS27, ils convergent avec ceux provenant de Tanzanie et de l'Angola au sud de la cuvette congolaise (Fig. 3e), puis alimentent le sud-est de l'Afrique australe (Fig. 3c), favorisant la convergence d'humidité à proximité du massif du Drakensberg, y induisant des biais positifs d'ascendance en moyenne troposphère (Fig. 4c).

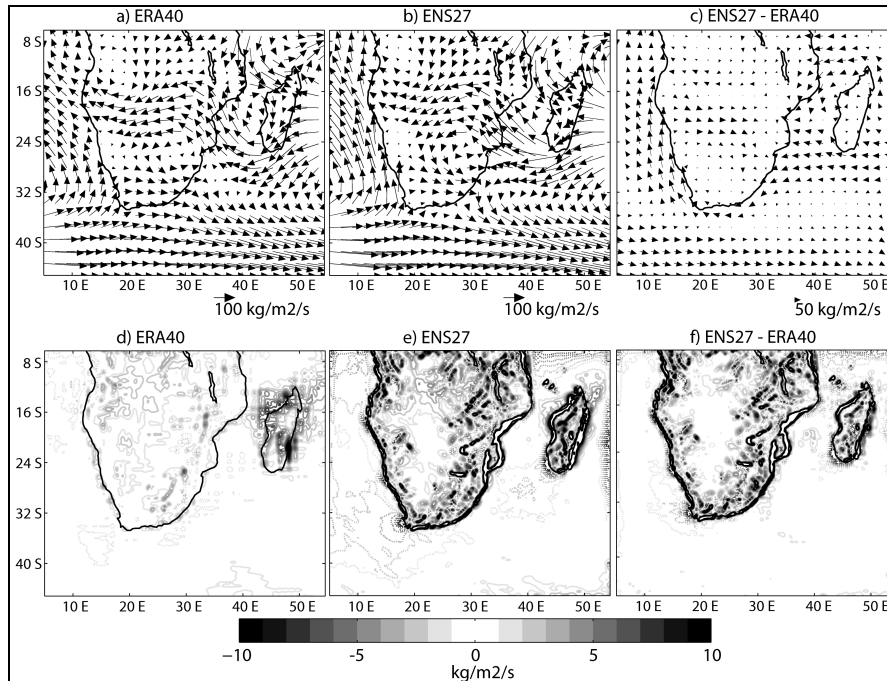


Figure 3 – Moyenne saisonnière des flux d'humidité intégrés entre 1000 et 200 hPa et de leur convergence simulée par (a-d) ERA40, (b-e) ENS27, et (c-f) biais saisonniers par rapport à ERA40. Pour le transport d'humidité (a à c), un vecteur sur 4 est montré. Pour la convergence d'humidité (d à f), les valeurs positives (négatives) sont montrées en traits continus (pointillés) et correspondent respectivement (d-e) à de la convergence (divergence) d'humidité et à (c) des biais de convergence (divergence) par rapport à ERA40. Seules les valeurs comprises entre -10 et +10 kg/m²/s sont montrées. L'intervalle entre chaque isoligne est de 1 kg/m²/s.

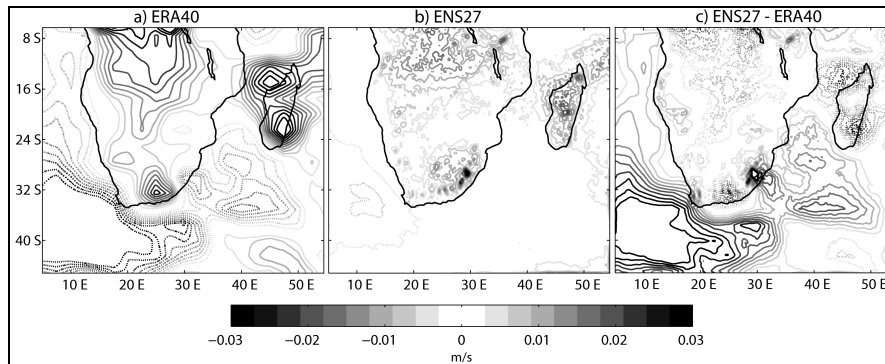


Figure 4 – Idem que Fig. 3 pour la vitesse verticale du vent à 500 hPa. Les valeurs positives (négatives) sont montrées en traits continus (pointillés) et correspondent respectivement (a-b) à des mouvements ascendants (subsidents) et (c) à des biais ascendants (subsidents) par rapport à ERA40. Seules les valeurs comprises entre -0,03 et +0,03 m/s sont montrées. L'intervalle entre chaque isoligne est de 0,03 m/s.

2.3. Sensibilité du champ pluviométrique simulé à la paramétrisation physique

La Figure 5 présente les précipitations LYNCH, GPCP, ERA40, et de chaque membre d'ENS27, cumulées sur DJF94 et moyennées spatialement sur le domaine renseigné par les stations sud-africaines à régime pluvial tropical. Elle montre que les cumuls précipités simulés par WRF sont très sensibles à la paramétrisation physique. Les cumuls simulés par le schéma de convection Kain-Fritsch (CO1) sont systématiquement supérieurs à ceux simulés par les schémas Betts-Miller-Janjic (CO2) et Grell (CO3). De même, ceux simulés avec le schéma de couche limite Mellor-Yamada-Janjic (CL1) sont supérieurs à ceux simulés par les deux autres. Les effets de ces schémas semblent additifs, de sorte que Kain-Fritsch combiné à Mellor-Yamada-Janjic est systématiquement la configuration produisant des cumuls les plus forts. L'impact des schémas de microphysique est également non négligeable; mais paraît non linéaire, excepté Morrison (MI3) qui simule systématiquement moins de pluie. Les combinaisons de ce dernier avec les schémas de convection CO2 ou CO3 et de couche limite CL2 / CL3 (E15, E18, E24) produisent des quantités simulées très encourageantes, car très proches des observations *in-situ* fournies par les observations. WRF offre donc une valeur ajoutée indéniable par rapport à ERA40, en corrigeant ses biais secs (Fig. 5) et simulant des structures spatiales plus réalistes (Figs. 1c et 2d). Pour ces combinaisons, la marge d'erreur de WRF apparaît du même ordre que celle des estimations GPCP. Ce résultat demande toutefois à être confirmé via un ensemble permettant de quantifier la variabilité interne du modèle.

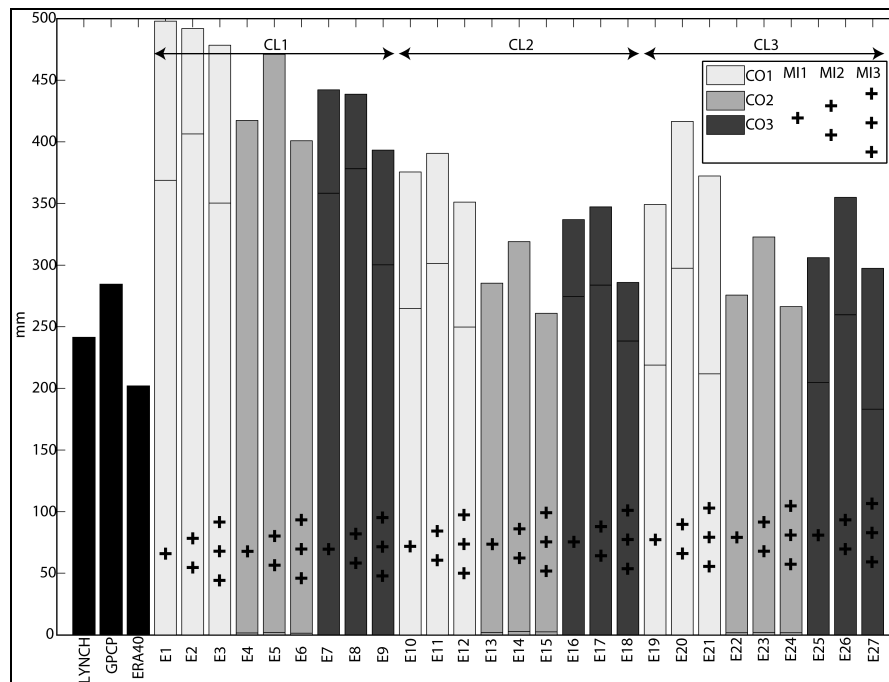


Figure 5 – Moyenne spatiale des cumuls précipités sur la saison DJF94 observée LYNCH, estimée GPCP et simulée par ERA40 et les 27 expériences numériques sur le domaine renseigné par les stations sud-africaines à régime tropical. Les acronymes de la légende sont définis Table 1.

La Figure 6 montre la part de pluies convectives en Afrique australe en DJF94. Logiquement, cette part est essentiellement modulée par la paramétrisation de la convection. Le cœur de la saison des pluies est dominé par la circulation tropicale, qui se traduit par des zones de convection profonde d'échelle globale à locale (ZCIT, ondes d'est, cellules orageuses). Ne simulant pas de pluie d'origine convective, le schéma Betts-Miller-Janjic (CO2) paraît inapproprié pour simuler ce type de processus pendant la saison étudiée. Excepté les 9 expériences paramétrisées avec ce schéma, les différences sont relativement faibles. Grell simule davantage de pluies convectives que Kain-Fritsch, mais les structures spatiales simulées par ces deux schémas de convection sont relativement proches, mettant en évidence trois régions contrastées : l'océan Atlantique relativement froid pour lequel il ne pleut pas, le subcontinent et la partie tropicale de l'océan Indien relativement chauds pour lesquels les pluies convectives sont maximales, et les moyennes latitudes soumises au passage de dépressions fournissant des pluies souvent non convectives. De plus, ces schémas simulent moins de pluies convectives sur les régions montagneuses (pluies probablement orographiques), et sur la côte sud-est de l'Afrique du Sud et les océans des latitudes subtropicales à tempérées, davantage soumis à des pluies stratiformes.

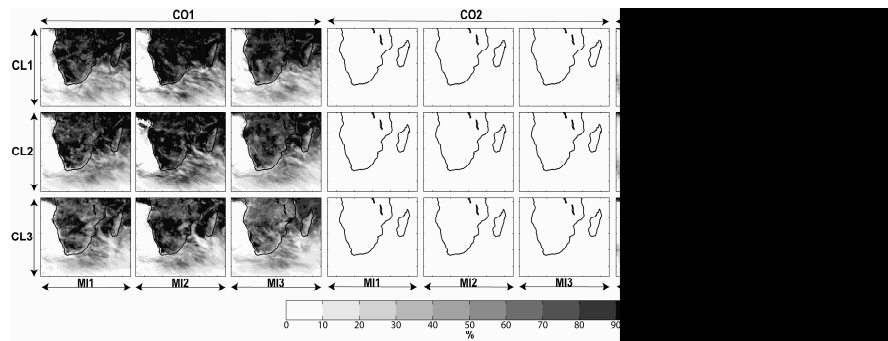


Figure 6 – Part des pluies convectives simulées par les 27 expériences. Les acronymes (cf Tab. 1) montrent comment sont placées les expériences au sein de la figure.

Conclusion et perspectives

Cette étude vise à déterminer les capacités de WRF à simuler les structures spatiales moyennes des précipitations du cœur de la saison des pluies de l'Afrique australe, à décrire et comprendre ses biais saisonniers moyens, et à déterminer sa sensibilité aux paramétrisations physiques (schémas de convection, microphysique et couche limite).

Pour les précipitations saisonnières, WRF apporte une réelle plus-value par rapport à ERA40 en corrigeant ses biais secs et simulant des structures spatiales prenant mieux en compte la topographie. Par comparaison aux observations (LYNCH) et aux estimations (GPCP) de pluie, les performances de WRF (paramétrisé avec les schémas de convection Betts-Miller-Janjic, ou Grell, combinés avec les schémas de couche limite Yonsei ou ACM2 et la microphysique Morrison) semblent aussi bonnes que GPCP en termes de cumul, et meilleures en termes de structure spatiale. Ceci tend à prouver que la prise en compte de processus d'échelle plus fine que dans les MCGA est un élément indispensable pour simuler correctement les précipitations à l'échelle des territoires. Les MCR, dont WRF, offrent ici un potentiel encore sous-exploité. Ce résultat est à confirmer par une approche ensembliste qui permettrait d'évaluer à la fois la dispersion inter-membre, la reproductibilité des résultats et la capacité du modèle à simuler la pluviométrie au pas de temps intra-saisonnier (nombre de jours de pluie, leur intensité, longueur de la saison des pluies...). Une étude de cas récente permettrait également de confronter les résultats du MCR à des jeux de données à forte résolution spatiale tels que le fichier GPCP disponible au pas de temps quotidien depuis 1996 à $1^\circ \times 1^\circ$ de résolution [Huffman & *al.*, 2001], et le fichier Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, [Huffman & *al.*, 2007]) disponible depuis 1998 sur une grille de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Cette comparaison est même indispensable pour les régions ne disposant pas d'un réseau dense de stations pluviométriques tel que celui de l'Afrique du Sud. Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus dans cette étude sont encourageants et suggèrent que l'on peut avoir relativement confiance au champ de pluie saisonnier simulé par un MCR.

L'analyse de chaque expérience montre une forte sensibilité des précipitations simulées par WRF à sa paramétrisation physique, tant en termes de quantités précipitées qu'en termes de type de pluies. Nous montrons que la paramétrisation de la convection est celle qui affecte le plus le champ de pluie saisonnier et surtout les processus pluvio-gènes. Parmi les 3 schémas de convection testés, les performances de Grell paraissent plus satisfaisantes que celles de Kain-Fritsch et de Betts-Miller-Janjic. Excepté lorsqu'il est combiné au schéma de couche limite Mellor-Yamada-Janjic, toutes les expériences utilisant ce schéma simulent des quantités relativement comparables aux observations sur la partie tropicale de l'Afrique du Sud, et des pluies essentiellement convectives en Afrique australe et sur la partie tropicale de l'océan Indien, constat cohérent avec la circulation tropicale dominante pendant le cœur de la saison des pluies.

Fortement sensibles à la paramétrisation physique, les MCR le sont également à d'autres réglages. Les travaux à venir consisteront dans un premier temps à sélectionner la configuration la plus réaliste parmi les tests effectués en mettant l'accent sur les précipitations, variable la plus difficile à simuler mais indispensable pour des études d'impact. Dans un second temps, des études de sensibilité supplémentaires seront menées pour déterminer les impacts de la taille du domaine simulé, du guidage, du schéma de surface continentale et de la résolution horizontale sur les performances de ce MCR.

Références bibliographiques

- ALEXANDRU, A., DE ELIA, R. & LAPRISE, R., 2007 – « Internal Variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale », *Monthly Weather Review*, vol. 135, n° 9, pp. 3221-3238.
- CHEN, F., MITCHELL, K., SCHAAKE, J., XUE, Y., PAN, H., KOREN, V., DUAN, Q., EK, M. & BETTS, A., 1996 – « Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations », *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n° D3, pp. 7251-7268.
- COOK, K., 2000 – « The South Indian Convergence Zone and Interannual Rainfall Variability over Southern Africa », *Journal of Climate*, vol. 13, n° 21, pp. 3789-3804.
- CRÉTAT, J., RICHARD, Y., POHL, B., ROUAULT, M., REASON, C. & FAUCHEREAU, N., 2009 – « Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer », *International Journal of Climatology*, submitted.
- DAI, A., 2006 – « Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models », *Journal of Climate*, vol. 19, n° 18, pp. 4605-4630.
- DUDHIA, J., 1989 – « Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model », *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 46, n° 20, pp. 3077-3107.
- GIORGI, F., 1990 – « Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model », *Journal of Climate*, vol. 3, n° 9, pp. 941-964.
- HUFFMAN, G., ADLER, G., MORRISSEY, M., BOLVIN, D., CURTIS, S., JOYCE, R., McGAVOCK, B. & SUSSKIND, J., 2001 – « Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 2, n° 1, pp. 36-50.
- HUFFMAN, G., ADLER, G., BOLVIN, D., GU, G., NELKIN, E., BOWMAN, K., HONG, Y., STOCKER, E. & WOLFF, D., 2007 – « The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 1, pp. 38-55.
- KOREN, V., SCHAAKE, J., MITCHELL, K., DUAN, Q., CHEN, Q. & BAKER, J., 1999 – « A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. », *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, n° D-16, pp. 19569-19585.

- LEUNG, L., MEARN, L., GIORGI, F. & WILBY, R., 2003 – « Regional climate research, needs and opportunities », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 84, n° 1, pp. 89-95.
- LINDESAY, J., 1988 – « South African Rainfall, The Southern Oscillation and a Southern Hemisphere Semi-Annual Cycle. », *International Journal of Climatology*, vol. 8, n° 1, pp. 17-30.
- LYNCH, S., 2003. – *Development of a raster database of annual, monthly and daily rainfall for Southern Africa*, Report No. 1156/1/04, Water Research Commission, Pretoria, South Africa, 78 p.
- MCGREGOR, J., WALSH, K. & KATZFEY, J., 1993 – *Nested Modelling for Regional Climate Studies*. John Wiley and Sons: Chichester, UK, pp. 367-385.
- MLAWER, E., TAUBMAN, S., BROWN, P., IACONO, M. & CLOUGH, S., 1997 – « Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. », *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n° D14, pp. 16663-16682.
- POCCARD, I., JANICOT, S. & CAMBERLIN, P., 2000 – « Comparison of rainfall structures between NCEP/NCAR reanalyses and observed data over tropical Africa », *Climate Dynamics*, vol. 16, n° 12, pp. 897-915.
- POCCARD, I., 2000 – *Etude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses. Exemples d'application aux précipitations en Afrique Tropicale*, Thèse de Doctorat CRC - Université de Bourgogne, Dijon, 244 p.
- ROUAULT, M. & RICHARD, Y., 2005 – « Intensity and spatial extent of droughts in Southern Africa », *Geophysical Research Letters*, vol. 32, n° 15, pp. 15702-15724, DOI:10.1029/2005GL022436.
- SKAMAROCK, W., KLEMP, J., DUDHIA, J., GILL, D., BARKER, D., DUDA, M., HUANG, X., WANG, W. & POWERS, J., 2008 – *A description of the advanced research WRF version 3*, NCAR technical note, NCAR/TN-475+(STR), 113 p.
- TODD, M. & WASHINGTON, R., 1999 – « Circulation anomalies with tropical-temperate troughs in Southern Africa and the South West Indian Ocean », *Climate Dynamics*, vol. 15, n° 12, pp. 937-951.
- TRENBERTH, K., 1991 – « Climate diagnostics from global analyses: Conservation of mass in ECMWF analyses », *Journal of Climate*, vol. 4, n° 7, pp. 707-722.
- TRENBERTH, K., STEPANIAK, D. & HURRELL, J., 2001 – « Quality of reanalyses in the Tropics », *Journal of Climate*, vol. 14, n° 7, pp. 1499-1510.
- UPPALA, S., KALLBERG, P., SIMMONS, A., ANDRAE, U., BECHTOLD, V., FIORINO, M., GIBSON, J., HASELER, J., HERNANDEZ, A., KELLY, G., LI, X., ONOGI, K., SAARINEN, S., SOKKA, N., ALLAN, R., ANDERSSON, E., ARPE, K., BALMASEDA, M., BELJAARS, A., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., CAIRES, S., CHEVALLIER, F., DETHOF, A., DRAGOSAVAC, M., FISHER, M., FUENTES, M., HAGEMANN, S., HOLM, E., HOSKINS, B., ISAKSEN, I., JANSSEN, P., JENNE, R., McNALLY, A., MAHFOUF, J., MORCRETTE, J., RAYNER, N., SAUNDERS, R., SIMON, P., STERL, A., TRENBERTH, K., UNTCH, A., VASILJEVIC, D., VITTEBO, P. & WOOLLEN, J., 2005 – « The ERA-40 re-analysis. », *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, vol. 131, n° 612, pp. 2961-3012.
- WASHINGTON, R. & TODD, M., 1999 – « Tropical-temperature links in Southern African and Southwest Indian Ocean satellite-derived daily rainfall. », *International Journal of Climatology*, vol. 19, n° 14, pp. 1602-1616.
- WILBY, R. & WIGLEY, T., 2000 – « Precipitation predictors for downscaling : observed and general circulation model relationships. », *International Journal of Climatology*, vol. 20, n° 6, pp. 641-661.
- WILKS, D., 1995 – *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press: San Diego, CA, 467 p.
- XIE, P., JANOWIAK, J., ARKIN, P., ADLER, R., GRUBER, A., FERRARO, R., HUFFMAN, G. & CURTIS, S., 2003. – « GPCP pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates », *Journal of Climate*, vol. 16, n° 13, pp. 2197-2214.